



## Approche fractale de l'urbanisation - Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles

Pierre Frankhauser, Cécile Tannier, Gilles Vuidel, Hélène Houot

### ► To cite this version:

Pierre Frankhauser, Cécile Tannier, Gilles Vuidel, Hélène Houot. Approche fractale de l'urbanisation - Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles. 11th World Conference on Transportation Research - Septièmes rencontres francophones Est-Ouest de socio-économie des transports, Jun 2007, Berkeley, Californie, États-Unis. pp.21. halshs-00461655

**HAL Id: halshs-00461655**

**<https://shs.hal.science/halshs-00461655>**

Submitted on 5 Mar 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## ***Approche fractale de l'urbanisation***

### ***Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles***

**Pierre Frankhauser<sup>1</sup>, Cécile Tannier<sup>2</sup>, Gilles Vuidel<sup>3</sup>, Hélène Houot<sup>4</sup>**  
**ThéMA, CNRS - Université de Franche-Comté, 32, rue Mégevand, F-25030**  
**Besançon Cedex**

<sup>1</sup> Professeur à l'Université de Franche-Comté, UMR 6049 ThéMA

<sup>2</sup> Chargée de recherche CNRS, UMR 6049 ThéMA

<sup>3</sup> Ingénieur d'étude en informatique, UMR 6049 ThéMA

<sup>4</sup> Maître de Conférence à l'Université de Franche-Comté, UMR 6049 ThéMA

### **Résumé**

Si les effets néfastes de la périurbanisation sont connus, il s'avère difficile de pallier à cette évolution. Le retour à une ville monocentrique dense ne paraît pas une solution réaliste d'autant plus qu'elle n'intègre pas suffisamment la demande sociale. Nous proposons un concept d'aménagement des espaces périurbains qui permet d'identifier les potentialités de développement en optimisant à la fois l'accessibilité aux différents types de services ainsi qu'aux zones de loisir et en évitant un morcellement des zones naturelles et agricoles. Ce concept multi-échelle est inspiré par la géométrie fractale. Il est illustré à travers un exemple.

### **Remerciement**

Les auteurs remercient le *Programme français de recherche et d'innovation dans les transports terrestres 3* (PREDIT 3) pour avoir financé ce projet de recherche (Plus d'informations sont disponibles sur le site Internet : <http://thema.univ-fcomte.fr/rubrique214.html>). Nos remerciements vont aussi à l'AUDAB (Agence d'Urbanisme de l'Agglomération de Besançon) pour la mise à disposition de données (BD topo IGN) dans le cadre d'une convention associant l'AUDAB à ThéMA pour le contrat PREDIT précité.

### **1. Introduction**

L'étalement urbain et la maîtrise de ses conséquences reste un défi important de l'aménagement du territoire. La périurbanisation est souvent à l'origine d'un étalement diffus de l'habitat dans les espaces limitrophes aux villes. Une des conséquences néfastes les plus souvent évoquées est une augmentation du nombre et de la longueur des déplacements, à laquelle s'ajoutent le morcellement de l'habitat et le risque associé de fragilisation des espaces naturels et agricoles.

Dans l'objectif de limiter cette évolution, de nombreux auteurs prônent la ville compacte. Ils mettent en avant le fait que celle-ci favorise l'utilisation des transports publics, permet une bonne accessibilité aux commerces et services et réduit la ségrégation sociale (cf. par exemple Dantzig et Saaty (1973), Newman et Kenworthy, 1989 et 1992). Dans le même esprit, des politiques ont été mises en place qui visent une densification des zones urbaines ou qui empêchent directement

la périurbanisation, comme c'est le cas au Royaume-Uni à travers la protection des « ceintures vertes ».

Toutefois, les politiques en faveur de la ville compacte connaissent des limites. La hausse des prix des logements, la congestion des axes routiers, une réduction de l'accès aux espaces verts et naturels, ont été largement discutés (Banister, 1992), (Breheny, 1992 et 1997), (Owens, 1992). De même, comme l'ont constaté certains auteurs, les opérations visant à densifier les zones résidentielles ont connu un échec relatif auprès des populations concernées (Garcia et Riera, 2003, Remy, 1994, Fouchier, 1995).

Une politique qui refuse la périurbanisation ne semble donc pas efficace, car elle ne tient pas suffisamment compte de la demande sociale. De fait, le niveau plus bas du prix foncier dans les zones plus éloignées des villes n'est pas la seule cause de l'étalement urbain. Bon nombre de résidents s'installant dans ces zones fuient la densité urbaine ; ils souhaitent habiter dans une maison individuelle entourée d'un jardin, et bénéficier d'un environnement vert et calme. En outre, certaines communes rurales cherchent à attirer des nouveaux habitants dans le but de pérenniser leurs infrastructures (écoles, petits commerces...).

Il semble donc utile de développer des stratégies d'aménagement dont le but n'est pas de refuser à tout prix l'étalement urbain mais de mieux le « canaliser », comme le proposent Beaucire et al. (1999), en intégrant la demande sociale. Ainsi la localisation de nouvelles constructions par rapport au réseau routier existant – et de façon plus générale la distance par rapport aux lieux régulièrement fréquentés – sont des critères qu'il est désormais nécessaire d'intégrer dans un développement périurbain. En effet la surface réellement consommée par la construction d'habitats reste souvent modeste par rapport à la surface consommée par de nouvelles infrastructures routières. Ainsi, dans les franges franciliennes, entre 1987 et 1997, 1,4% de l'espace a été consommé par des bâtiments de type résidentiel et mixte, contre plus de 50% par des routes et plus de 25 % par des carrières et des chantiers (Tourneux, 2006).

Dans cet article, nous proposons un concept d'aménagement des espaces périurbains, basé sur une démarche modélisatrice, dont l'objectif est d'optimiser l'accessibilité aux différents types de commerces et services, ainsi qu'aux espaces verts, naturels et de loisir, tout en évitant le morcellement des zones bâties, naturelles ou agricoles.

## 2. Comment structurer les nouveaux espaces urbains ?

Avant la motorisation les déplacements domicile-travail périurbains étaient fortement liés à l'accessibilité ferroviaire, le réseau suivant une logique d'organisation plutôt axiale. A l'heure actuelle, le réseau routier couvre les espaces à proximité des villes de manière quasi uniforme

Cette qualité d'accessibilité, réservée au départ aux espaces densément urbanisés, a provoqué une périurbanisation dans des endroits très éloignés de tout service, même de services banaux. Une telle évolution a généré (et génère encore) non seulement du trafic, mais tend en outre à uniformiser l'image des communes et à fragiliser cela même que les nouveaux résidents recherchent : l'originalité d'un paysage diversifié.

Par leur étendue, les agglomérations actuelles occupent des territoires développés autour d'une ville-centre, et contiennent aussi souvent d'autres villes de taille différentes, des communes périurbaines, rurales, des espaces agricoles et naturels, etc. Les nouveaux espaces urbains correspondent donc à un système de peuplement rassemblant différents types et niveaux de fonctions.

Pour « canaliser » la périurbanisation, il importe de tenir compte de ces aspects particuliers des nouveaux espaces urbains, mais également d'intégrer les pratiques spatiales et les attentes des résidents. Certains concepts d'urbanisme ont déjà développé de telles réflexions. Ainsi par exemple, le fameux plan de « doigts de gants » de Copenhague présente une articulation forte entre zones bâties et zones vertes (figure 1).



**Figure 1**

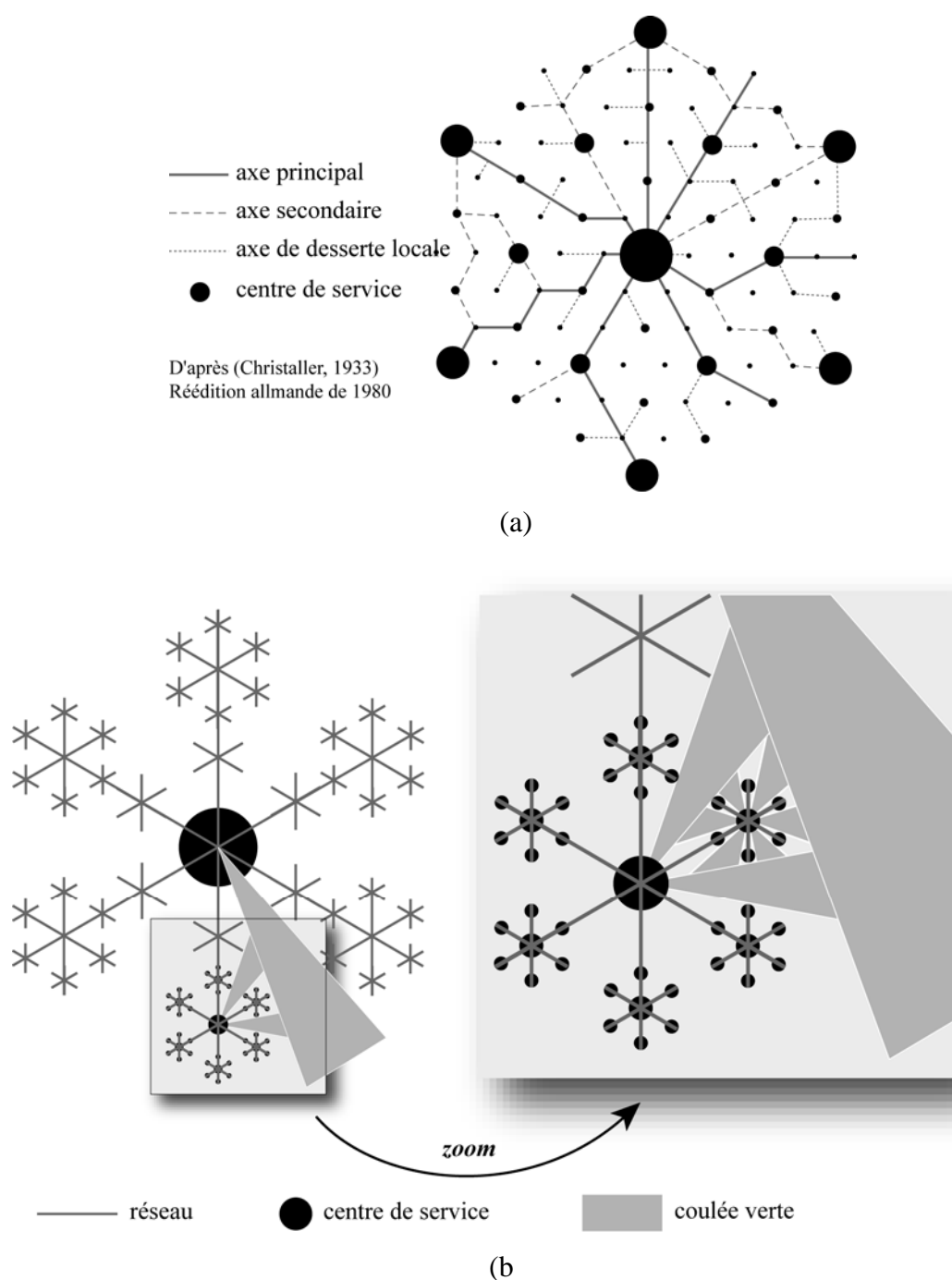
*Le plan de développement en « doigts de gants » pour l'agglomération de Copenhague.*

Une politique similaire a été mise en place à Berlin. Dans le deux cas, les zones urbanisées sont desservies par un réseau RER. Cependant, le seul développement axial ne paraît pas suffisant pour assurer une structuration fonctionnelle à l'échelle d'une grande agglomération. Comme le fait par exemple remarquer V. Fouchier (1995), le développement de centres secondaires paraît indispensable pour réduire les flux de trafic. On retrouve de tels principes dans le concept anglo-saxon des « villages urbains », qui tente de créer une offre de services banaux à une échelle locale tout en localisant des fonctions commerciales et culturelles dans des sous-centres accessibles par des systèmes de transport à la demande (Billard (2000)). Des réseaux de transport en commun plus classiques (RER ...) relient ces centres secondaires à la ville-centre, qui concentre les services rares, les centres de formation supérieure, etc. (Fouchier, 1995).

### 3. Des modèles fractals d'urbanisation pour optimiser l'accessibilité à des aménités de nature variée

L'idée d'introduire un système hiérarchique de villes qui distingue différents niveaux de service rappelle la logique de la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933), dont le schéma est représenté dans la figure 2a. Ce système crée des proximités aux services en fonction de leur fréquence de recours dans le but réduire les flux de trafic. Toutefois, le semis des noyaux de peuplement est uniforme, ce qui induit des

distances assez importantes aux centres les plus proches offrant un certain niveau de services. Ce modèle ne considère que l'accès aux services, mais n'introduit pas de réflexions relatives aux zones non construites, notamment récréatives.



**Figure 2**

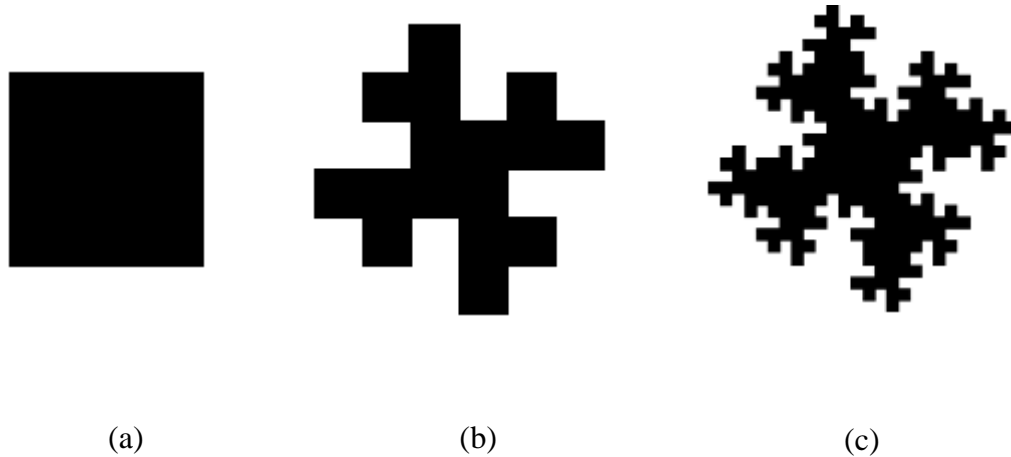
*Le réseau des lieux centraux de Christaller (a) et un réseau hexagonal (multi)fractal (b).*

Contrairement à la géométrie euclidienne, la géométrie fractale génère par définition des structures spatiales multi-échelle, hiérarchisées, d'où son intérêt dans le contexte donné. Elle nous permet par exemple de modifier le schéma de Christaller. En appliquant une logique (multi)fractale, nous pouvons notamment réduire les distances aux centres de services secondaires. Sur la figure 2b, nous avons tout simplement rapproché les centres urbains secondaires de la ville-centre de taille immédiatement supérieure dans la hiérarchie des services. Ainsi, les centres secondaires sont plus proches des principaux axes de transport qui relient les espaces périphériques au centre principal situé au coeur du schéma. Comme les centres secondaires sont en même temps des points d'interconnexion du réseau de transport, la concentration des flux vers les axes de transport principaux permet d'imaginer la mise en place d'un système de transport en commun pertinent et une logique de rabattement vers ce réseau. Cette configuration permet en outre de créer un système de coulées vertes qui pénètrent à de multiples endroits de l'agglomération. Les coulées vertes de taille importante peuvent être associées à des réserves naturelles, des zones rurales ou des zones de loisir, dont la fonction se situe à une échelle plutôt régionale. Par ailleurs, elles séparent les aires de chalandises des centres urbains secondaires. Le faible nombre d'interconnexions entre ces différents sous-systèmes, réduit l'accessibilité aux autres centres offrant le même type de service et évite ainsi des coupures dans les zones vertes. Une telle situation généralise les réflexions conceptuelles telles que nous les avons rencontrées pour Copenhague et Berlin, en appliquant la logique radioconcentrique également pour les sous-centres de différent niveau. Les impacts économiques d'un modèle similaire ont été étudiés dans Cavaillès et al. (2004).

Si le modèle présenté peut constituer un point de départ à des réflexions sur la localisation et l'accès aux services à l'échelle d'une agglomération, nous considérons maintenant un autre niveau d'analyse, celui de la répartition de la surface bâtie à l'échelle d'une ville ou d'un village périurbain. Le modèle de la ville compacte se manifeste souvent à travers un objectif d'aménagement qui consiste à lisser les bordures urbaines. Nous proposons au contraire, appliquant une logique fractale, de développer un modèle qui articule les zones habitées et le paysage ouvert (donc, favorise un allongement de la bordure urbanisée), tout en évitant un morcellement des zones non-urbanisées et sans augmenter la consommation d'espace. L'objectif est ici d'améliorer l'accessibilité aux zones de loisir tout en gardant un maximum de centralité. Considérons par exemple une surface bâtie donnée, représentée en noir, pour laquelle nous comparons différents scénarios de répartition (a), (b) et (c) (figure 3).

Le scénario (a) montre un carré qui symbolise une ville compacte offrant peu de terrains situés en bordure de la ville, donc limitrophes au paysage ouvert. Dans le scénario (b), la surface noire a été répartie autrement : des poches non bâties pénètrent dans la surface bâtie, la longueur de la bordure est ainsi le double de celle du carré. Dans le scénario (c), nous avons ajouté de nouvelles petites poches « vertes » et la longueur de la bordure a encore doublé. Un tel allongement de la bordure, qui correspond à une logique fractale, permet à un nombre important de personnes de s'implanter sur des parcelles situées en bordure de la ville et de bénéficier d'un contact direct avec le paysage ouvert, pour autant que les poches vertes préservées ne soient pas trop petites. Ceci permet d'améliorer l'accès au paysage ouvert pour l'ensemble des habitations. On vérifie que la distance minimale

moyenne pour accéder à la bordure tombe à 56% de la longueur de (a) avec le scénario (b), tandis que le scénario (c) permet un gain supplémentaire de 9%. On pourrait toutefois imaginer qu'une telle structure, plus étalée, diminue l'accessibilité au centre de la ville. Nous avons donc calculé la distance moyenne minimale au centre. Pour le scénario (b), la distance moyenne au centre est 12% supérieure par rapport au scénario (a). Pour le scénario (c), la distance moyenne au centre est encore une fois augmentée de 4%. Globalement, le gain d'accessibilité au paysage ouvert est donc plus important que la perte d'accessibilité au centre ville (cf. Frankhauser et Genre-Grandpierre, 1998) pour la déduction complète des calculs).



**Figure 3**

*Trois manières d'envisager la bordure urbaine : du carré (a) au téragone (b et c).*

Ces deux exemples montrent que la géométrie fractale permet de proposer des idées qui amènent à réorienter l'aménagement des nouveaux espaces urbains. Il est possible de travailler tant à partir de structures réseautiques, donc d'aspect linéaire (figure 2b), que de structures surfaciques (figure 3). Les deux modèles présentés constituent la base conceptuelle d'une méthodologie particulière que nous avons mis en place.

#### 4. Une approche opérationnelle basée sur une méthodologie en trois étapes

Nous montrons maintenant de quelle manière il est possible de développer une approche opérationnelle qui se réfère à la logique fractale. La démarche proposée prévoit trois étapes :

- **Première étape : calculs d'accessibilité multi-échelle.** Un diagnostic est établi pour l'espace concerné à partir de méthodes spécifiques. L'accent est mis sur l'accessibilité aux services des différents niveaux hiérarchiques, évaluée à partir des réseaux de transport existants, et sur l'accès aux zones de loisir et au paysage ouvert.
- **Deuxième étape : simuler l'ouverture de nouveaux espaces à l'urbanisation.** Une méthode d'analyse spécifique a été développée, la décomposition fractale, qui identifie la position du bâti à travers une approche multi-échelle. Elle permet d'identifier le paramètre qui décrit les caractéristiques fractales de la répartition

actuelle du bâti. Un simulateur, en cours d'élaboration, permet de générer des scénarios de développement possible. En s'appuyant sur la situation existante (accessibilité aux services et aux espaces de loisir), ainsi que de normes d'aménagement prédéfinies (comportement fractal, proximité au paysage ouvert), il identifie les lieux où un développement de l'urbanisation est envisageable.

- **Troisième étape : évaluer les simulations réalisées.** Les scénarios d'aménagement simulés sont évalués sur la base de calculs d'accessibilité multi-échelle (application des mêmes méthodes que pour la première étape) et des normes d'aménagement prédéfinies (cf. deuxième étape).

## 5. Une approche multi-échelle de l'accessibilité

La méthodologie mise en place sert à analyser l'accessibilité aux différents types d'aménités offertes aux résidents et à identifier à la fois les points qu'il serait utile d'améliorer et les potentialités de développement. Comme un objectif important est de proposer des scénarios d'aménagement qui permettent une réduction de la longueur totale des déplacements, nous avons donc distingué différents types d'aménités « urbaines » (commerces et services) et « rurales » (espaces verts, naturels et de loisir) en tenant compte de leur fréquence de recours par les résidents. Dans cet article, nous avons choisi d'illustrer la méthodologie développée uniquement à travers la mesure de l'accessibilité aux commerces et services.

Nous souhaitons simplement préciser que les mesures d'accessibilité aux espaces verts et naturels sont basées sur l'identification des enveloppes d'ensembles morphologiques cohérents à travers les échelles (Frankhauser et Tannier, 2005). Elles permettent d'extraire, à partir d'une image du tissu bâti, une représentation graphique des espaces libres propres à un niveau d'échelle donné. Ces espaces libres sont supposés être des espaces verts et naturels. Il est alors possible de caractériser la qualité de l'articulation entre paysage ouvert et espace bâti et d'identifier le nombre de terrains qui bénéficient d'un accès direct au paysage ouvert. L'accessibilité aux espaces verts et naturels via le réseau de transport est mesurée en définissant des critères d'accessibilité spécifiques à chaque type d'espaces (Tannier et al., 2006).

Quatre classes de services ont été définies. Nous les présentons ici sans commentaire. Tenant compte des espaces étudiés jusqu'ici (zones périurbaines d'une capitale régionale française, Besançon), les niveaux 3 et 4 se confondent en pratique. Ils ne sont donc pas distingués. Les applications que nous présentons dans la suite ne se réfèrent qu'aux niveaux 1 et 2.

- *Niveau 1* (recours quotidien ou pluri-hebdomadaire) : boulangerie, tabac/journaux, écoles, boucherie/charcuterie/traiteur, commerce alimentaire (supermarché et, éventuellement, supérette pour les populations captives et surtout, en milieu urbain). Nous supposons qu'il s'agit de distances qui peuvent être parcourues à pied à partir du domicile. La portée maximale considérée est fixée à 400 m. (Wiel et al., 1997).
- *Niveau 2* (recours hebdomadaire) : réparation automobile, café, hypermarché (2 niveaux de fréquence de recours), épicerie/supérette, ou lieu de fréquentation contrainte assez régulière : poste, pharmacie, médecin généraliste. Pour les analyses effectuées, on identifie, pour chaque type de service, tous les bâtiments qui sont plus proches de ce service que des autres établissements du même type (aire de chalandise théorique).



- *Niveau 3* (recours mensuel) : coiffeur, petites, moyennes et grandes surfaces spécialisées, banques-assurances, restaurant, bar spécialisé ou thématique, cinéma, théâtre, patinoire. Sont aussi affectés à ce niveau des lieux de fréquentation contrainte plus épisodique tels que les mairies.
- *Niveau 4* (recours plus rare) : préfecture, impôts, hôpital, médecins spécialistes, laboratoires d'analyse médicale, hall d'exposition, magasins spécialisés, services et administrations de fréquentation rare, à destination d'un grand nombre de personnes.

## 6. Analyser l'accès aux services à partir d'une logique fractale

Afin de pouvoir évaluer la performance de l'accès aux différentes aménités fourni par le réseau et d'identifier les potentialités de développement, différents aspects sont étudiés à travers une approche fractale. Le but est de vérifier dans quelle mesure l'organisation spatiale des réseaux de transport suit une logique fractale. Nous avons recouru à des méthodes d'analyse connues que nous avons complétées par de nouvelles méthodes adaptées au contexte donné. Ces analyses ne se limitent pas à la seule mesure d'indicateurs, tels que des dimensions fractales, mais sont aussi utilisées pour localiser des zones de développement potentiel en considérant l'allure des courbes d'analyse. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel *Fractalyse 2.4* (Vuidel et al., 2006).

Le point de départ des analyses est de considérer la localisation de différents types de commerces et services dans une agglomération. Pour chaque localisation, il est possible de mesurer son accessibilité par le réseau de transport. Deux premières méthodes (analyse radiale du réseau et analyse fractale d'accessibilité) mettent en évidence l'accessibilité au commerce ou service potentiellement fournie par le réseau, sans considérer la présence réelle d'habitations, la troisième méthode (analyse fractale de desserte) met en relation le réseau et les bâtiments réellement desservis.

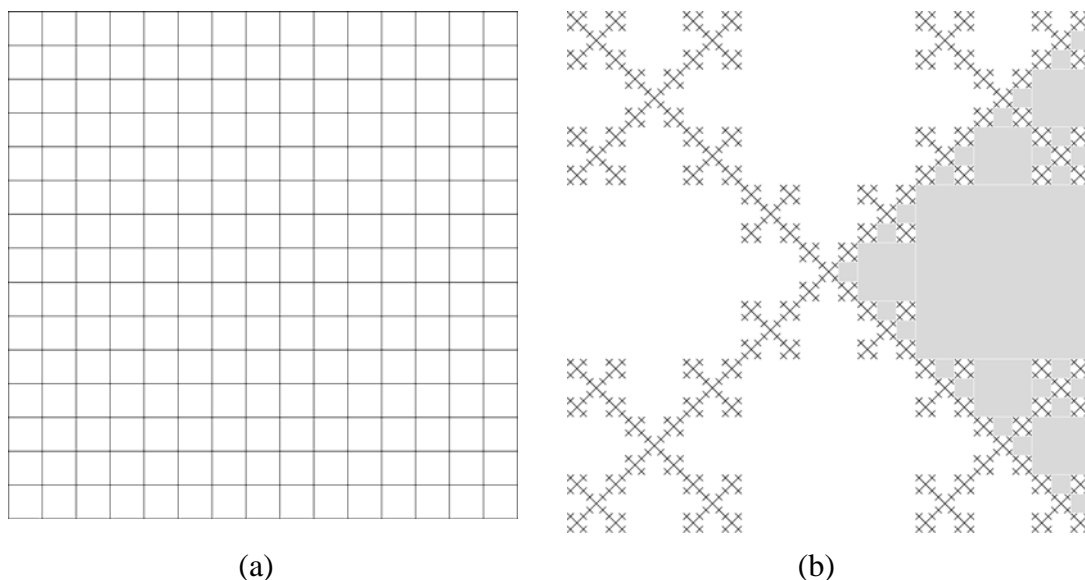
Ces trois méthodes sont ici appliqué aux services du *niveau 1*. Nous présentons et nous illustrons la méthodologie essentiellement à travers l'exemple de Saône, bourg-centre situé à 11 km du centre ville de Besançon. Par son offre de services, Saône correspond au *niveau 2*. Le village bénéficie d'une liaison routière et ferroviaire directe avec Besançon.

### 6.1 L'analyse radiale du réseau

L'analyse radiale est une des méthodes standards utilisées pour analyser les propriétés fractales de structures spatiales. Elle a été appliquée par différents auteurs pour analyser les réseaux de transport (Thibault et Marchand (1987), Benguigui et Daoud (1991), Batty et Longley (1994), Frankhauser (1994), Genre-Grandpierre, 1999 et 2000).

La procédure est la suivante : on choisit d'abord un point de comptage, dans notre cas la localisation d'un service, puis on détermine la longueur totale  $N(\varepsilon)$  du réseau, qui se trouve à une distance inférieure à une distance donnée  $\varepsilon$  de ce point. Cette opération est répétée pour des distances  $\varepsilon$  croissantes. On représente la courbe  $N(\varepsilon)$  en fonction de  $\varepsilon$ . Si le réseau étudié est fractal, cette courbe doit suivre une fonction puissance. L'exposant de cette fonction correspond à la dimension fractale  $D$  qui

décrit le degré de hiérarchisation du réseau étudié. Si le réseau couvre l'espace de manière uniforme, comme le fait une grille à maillage régulier, on obtient une valeur  $D = 2$  (figure 4a). En revanche, un réseau fractal, dont la dimension serait  $D < 2$ , irrigue l'espace de manière inégale, selon un principe hiérarchique : il existe peu de grands espaces non desservis par le réseau, mais un nombre croissant d'espaces de taille de plus en plus petite, qui sont pas desservis (figure 4b). La dimension  $D = 1$  caractérise un réseau strictement linéaire.



**Figure 4**

*Réseau uniforme maillé (a) et réseau fractal hiérarchisé (b), les espaces non desservis représentés en grisé.*

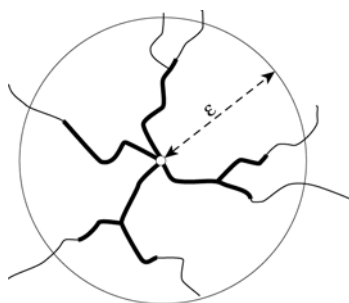
*Pour un service, la localisation au centre serait optimale.*

L'intérêt particulier de l'analyse radiale résulte du fait qu'elle met en évidence la structure radioconcentrique d'un réseau. Ainsi, pour la fractale de la figure 4b, la courbe d'analyse la plus régulière est obtenue en choisissant le nœud le plus central comme point de comptage. A travers l'aspect de la courbe d'analyse, on peut vérifier dans quelle mesure la localisation d'un service est optimale par rapport à une logique radioconcentrique. La dimension  $D_{rad}$  indique alors dans quelle mesure la couverture de l'espace par le réseau diminue en s'éloignant du service. Le réseau étant caractérisé par ses propriétés multi-échelle, l'information obtenue par la dimension fractale est bien différente de celle fournie par la densité.

## 6.2 L'analyse fractale d'accessibilité

L'analyse fractale d'accessibilité, souvent désignée dans la littérature par l'expression d'analyse d'étalement (Gouyet, 1992, Genre-Grandpierre, 1999), suit une logique semblable à l'analyse radiale du réseau, mais les distances  $\lambda$  sont cette fois mesurées sur le réseau. Dans le cas d'un réseau fractal, une loi de puissance relie le nombre total de lieux accessibles par le réseau à la distance  $\lambda$ . L'exposant scalant de cette fonction donne la dimension d'accessibilité locale  $D_{acc}$ . Les points de comptage correspondent toujours à la localisation des services.

L'analyse fractale d'accessibilité se réfère au fait qu'un réseau peut être à la fois ramifié et tortueux (Gouyet, 1992) : si les branches sont tortueuses on atteindra, pour une valeur de distance  $\lambda$  donnée, moins de sites qu'on aurait atteint si on avait utilisé la même valeur de distance euclidienne  $\varepsilon$  dans l'analyse radiale (cf. figure 5). Ceci explique la relation  $D_{acc} \leq D_{rad}$  où l'égalité entre les deux dimensions est atteinte uniquement dans le cas de réseaux ramifiés, mais non tortueux, tels que celui présenté en figure 4b.



**Figure 5**

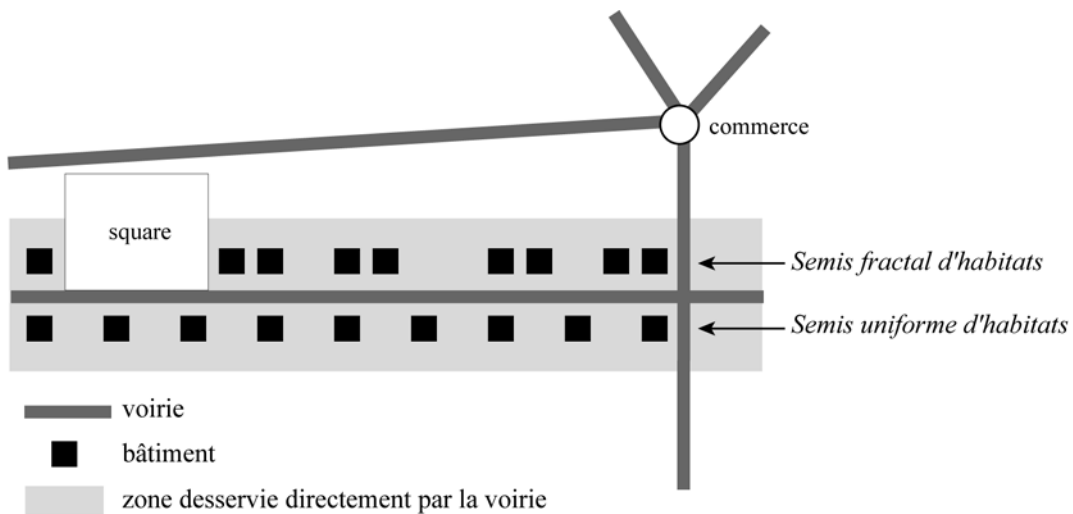
*Illustration de la différence entre une distance euclidienne  $\varepsilon$  et la même distance  $\lambda$  mesurée sur le réseau.*

L'analyse radiale d'un réseau caractérise donc à la fois sa tortuosité et sa ramification ; comme l'analyse d'accessibilité caractérise uniquement sa ramification, la comparaison entre l'analyse radiale et l'analyse d'accessibilité met en évidence sa tortuosité.

La figure 6 montre l'application de l'analyse radiale (a) et l'analyse d'accessibilité (b) à une boulangerie située au cœur de Saône. A partir des inflexions des courbes d'analyse, il est possible d'identifier sur les représentations cartographiques correspondants les distances euclidiennes (a) ou mesurées sur le réseau (b) pour lesquelles l'accessibilité baisse. Cette distance se situe à environ 1130 m. de la boulangerie, mesurée sur le réseau (c) ; elle correspond à peu près à la limite de la zone urbanisée. L'aspect régulier des courbes pour la zone intra-urbaine signifie que la boulangerie est bien située au regard d'une logique d'accessibilité radioconcentrique. Par ailleurs, le réseau n'est pas très tortueux (résultats similaires obtenus pour les analyses radiales et d'accessibilité).

### 6.3 L'analyse fractale de desserte

Le bâti dans une ville n'est pas nécessairement réparti uniformément le long de la voirie. Il peut former des groupes de bâtiments séparés par des espaces non construits de taille variable. Si la taille des espaces non construits suit une logique hiérarchique, on retrouve de nouveau un principe d'organisation fractal (cf. figure 7), une telle distribution hiérarchique pouvant d'ailleurs être favorable à l'implantation d'équipements collectifs. Une fonction puissance permet de représenter la relation entre le nombre de bâtiments desservis et une distance  $\lambda$  à un service donné mesurée sur le réseau. L'exposant de cette relation est appelé *dimension fractale de desserte*. Elle caractérise la desserte réelle de bâtiments assurée par le réseau. Si le bâti est réparti uniformément le long du réseau,  $D_{des} = D_{acc}$  (pour la démonstration cf. Tannier et al., 2006).



#### Extension d'un semis linéaire d'habitats suivant une logique fractale

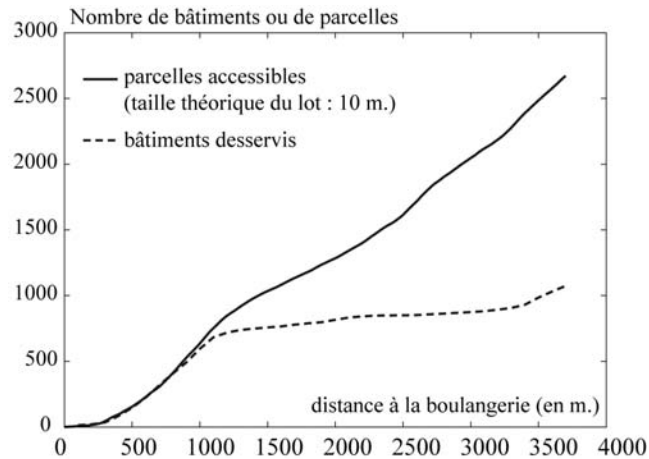


**Figure 6**

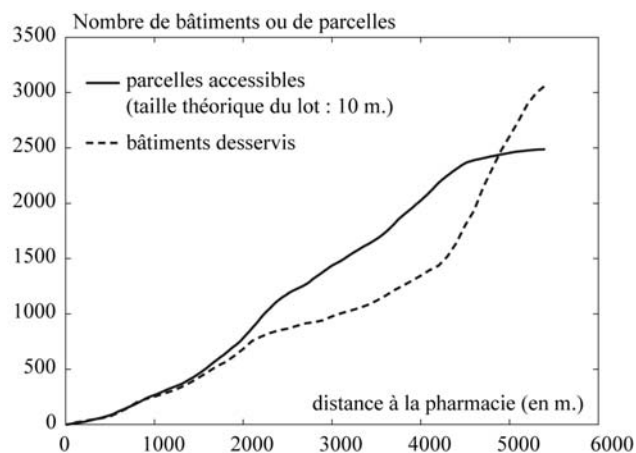
*Répartition uniforme et fractale des habitations le long d'un réseau routier.*

La comparaison des courbes d'analyse d'accessibilité et de desserte est particulièrement intéressante. La figure 8a présente les deux courbes obtenues pour le village de Saône. Celles-ci sont presque identiques à l'intérieur de la zone urbanisée, Ceci indique que le bâti est uniforme le long du réseau et qu'il reste peu d'espaces urbanisables suivant une organisation multi-échelle le long du réseau. La situation est très différente pour une pharmacie située dans autre village périurbain de Besançon,

Châtillon-le-Duc (figure 8b). Le fort décalage entre les deux courbes montre qu'il existe des zones peu urbanisées le long d'une grande partie du réseau. En outre, la courbe de desserte est assez irrégulière. L'absence de raison fonctionnelle pour ce déficit de bâti (présence de squares, places...) permet de conclure que le bâti n'est pas réparti de manière fractale le long du réseau. L'urbanisation autour de la pharmacie n'est pas en cohérence avec le réseau et celle-ci apparaît assez mal positionnée par rapport au réseau et aux habitations. Notons par ailleurs que l'urbanisation de ce village est assez morcelée et fortement contrainte par le relief.



(a)



(b)

**Figure 8**

*Courbes de l'analyse d'accessibilité et de desserte pour une boulangerie de Saône (a) et une pharmacie de Châtillon-le-Duc (b).*

## 7. Simuler l'ouverture de nouveaux espaces à l'urbanisation

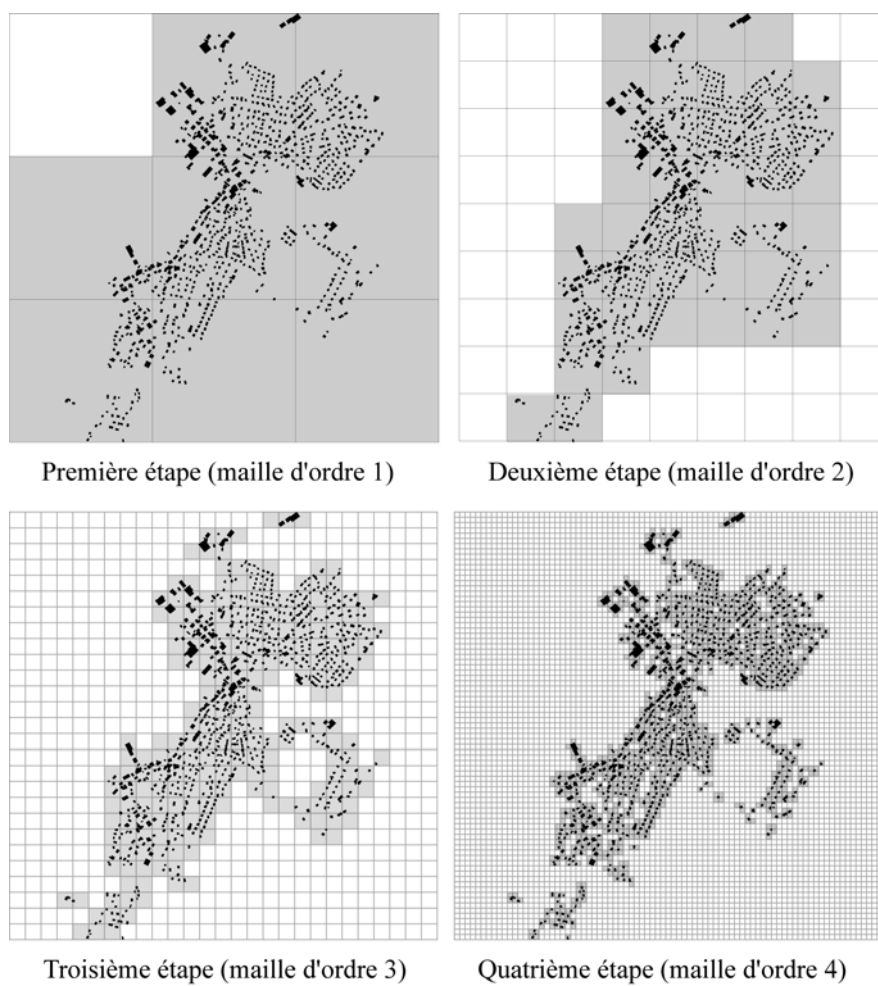
### 7.1 Identifier des paramètres fractals correspondant au tissu bâti existant

Nous présentons ici une méthode nouvelle, la décomposition fractale, actuellement en cours d'élaboration dans le cadre du projet PREDIT. L'objectif premier n'est pas d'obtenir une courbe d'analyse ou un indicateur, tel qu'une dimension fractale, mais de visualiser et d'analyser la répartition spatiale du bâti à travers une approche fractale. La décomposition fractale fournit la base à la simulation de scénarios d'urbanisation future. Elle a été appliquée jusqu'ici à l'échelle urbaine. Nous illustrons la méthode de nouveau à travers l'exemple de Saône.

Nous avons développé une approche qui s'inspire de celle de la couverture (cf. Falconer, 1985). Après avoir sélectionné une zone d'étude, on la couvre d'une grille constituée de  $\nu \times \nu = \nu^2$  mailles quadratiques que nous désignons par l'expression « mailles d'ordre 1 ». Puis, chaque maille d'ordre 1 est décomposée en  $\nu \times \nu$  mailles de taille réduite que nous appelons d'ordre 2. La zone d'étude contient alors  $\nu^4$  mailles d'ordre 2. Cette opération est répétée jusqu'à ce que la taille des mailles s'approche de celle des bâtiments (figure 9).

Pour chaque maille d'ordre  $(i)$ , nous comptons le nombre  $N^{(i+1)}$  de mailles d'ordre  $(i+1)$  qui contiennent du bâti. Ceci nous permet de calculer, pour chaque étape de décomposition, le nombre moyen de cellules urbanisées (ou mailles d'ordre  $(i+1)$ ) par maille d'ordre  $(i)$ . La moyenne géométrique de ce nombre pour l'ensemble des étapes de décomposition fournit le deuxième paramètre ( $N_{emp}$ ). Avec les deux paramètres,  $\nu$  et  $N_{emp}$ , il est possible de calculer la dimension fractale du bâti

$$D_{emp} = \frac{\log N_{emp}}{\log \nu}.$$



**Figure 9**

*Décomposition fractale de la zone urbanisée de Saône. La grille choisie correspond à  $\nu = 3$ .*

## 7.2 Appliquer ces paramètres pour illustrer un développement possible sous contraintes d'accessibilité

Nous disposons maintenant des éléments qui permettent d'appliquer la logique fractale à des scénarios d'urbanisation future. Rappelons ici que le but est de simuler des scénarios de développement qui optimisent simultanément l'accès à des services de différents niveaux et au paysage ouvert (zones de loisir). Nous prenons en compte :

- les caractéristiques du tissu bâti existant,
- les caractéristiques du réseau de transport et l'accessibilité multi-échelle aux services,
- la qualité du contact direct (multi-échelle) entre le tissu bâti et le paysage ouvert.

Les simulations s'appuient directement sur les résultats des analyses d'accessibilité et de desserte, et sur la décomposition fractale du bâti. Les espaces caractérisés par une bonne accessibilité, mais en déficit de bâtiments, sont considérés comme urbanisables en priorité.

En fonction de la grille adoptée (choix d'une valeur de  $\nu$ ) et d'une dimension fractale fixée  $D$ , il est possible de calculer un nombre maximal  $N = \nu^D$  de cellules qui peuvent être bâties dans chaque maille de la grille :

- La dimension fractale  $D$  considérée peut être celle du tissu bâti étudié ( $D_{emp}$ ). Alors  $N_{emp}$  est le nombre maximal de cellules pouvant être bâties suivant strictement la logique du tissu bâti existant.
- La dimension fractale  $D$  considérée peut aussi correspondre à une limite fixée ( $D_{lim}$ ), le nombre maximal  $N_{lim} = \nu^{D_{lim}}$  de cellules pouvant être bâties correspondant alors à une référence "absolue". Il est alors nécessaire de définir une *norme fractale d'aménagement* qui caractérise l'articulation entre espaces bâtis et non bâtis. Dans le périurbain, la limite devrait se situer dans la fourchette  $D_{lim} \in [1,60 ; 1,72]$ . La valeur supérieure de cet intervalle permet d'éviter une densification trop importante du bâti (non souhaitée par la population), tandis que la valeur inférieure fixée évite une trop grande consommation d'espace.

En comparant à  $N_{emp}$  à  $N_{lim}$ , il est possible de déterminer si la densification multi-échelle d'un tissu bâti peut être réalisée ou si le bâti est trop compact pour l'envisager.

Afin de tenir compte tant de la qualité de l'accessibilité que de l'organisation multi-échelles du bâti, une autre *norme fractale d'aménagement* doit être introduite, qui préconise la dimension fractale d'accessibilité. La limite supérieure de l'intervalle devrait se situer autour de  $D_{acc} \in [1,45 ; 1,6]$ . (Une valeur d'accessibilité trop faible réduit l'aire de chalandise théorique d'un service). En introduisant la taille des terrains et le nombre de ménages par terrain, il est possible d'estimer la clientèle potentielle d'un service.

La simulation consiste à transformer des cellules non bâties en cellules bâties, pour les différentes étapes de maillage déterminées par la décomposition fractale. Une cellule peut être bâtie si le nombre  $N_{lim}$  ou  $N_{emp}$  de cellules bâties dans la maille n'est



pas dépassé et si certaines conditions sont remplies. Nous avons formulé ces conditions sous formes de règles qui reprennent les objectifs d'aménagement énoncés précédemment.

**Tableau 1 : règles présidant à la simulation**

Tableau 1

	Intitulé de la règle	Niveau de priorité
1.	La maille doit être voisine d'une maille déjà construite ou constructible (bâti continu, dans le but d'éviter un morcellement du bâti) ( <i>référence au téragone</i> )	priorité 1
2.	La maille doit être traversée d'une voie de communication	priorité 2
3.	La maille doit être voisine d'une maille non construite. En la convertissant en maille bâtie, elle ne doit pas obstruer l'accès au paysage des mailles voisines déjà bâties (accès direct du bâti continu au paysage ouvert) ( <i>référence au téragone</i> )	priorité 2
4.	Préservation de la contiguïté des zones non construites	priorité 1
5.	L'accès aux services existants de niveau 1 ne doit pas excéder 400 m.	priorité 3
6.	L'accès aux services de niveau 2 ne doit pas excéder une distance à définir ( <i>référence au schéma cristallérien modifié</i> )	priorité 3
7.	L'accès aux services de niveau 3 ne doit pas excéder une distance à définir ( <i>référence au schéma cristallérien modifié</i> )	priorité 1
8.	Une cellule est inconstructible si elle se trouve dans une zone naturelle protégée. D'autres contraintes sont possibles (utilisation agricole, relief...)	priorité 1

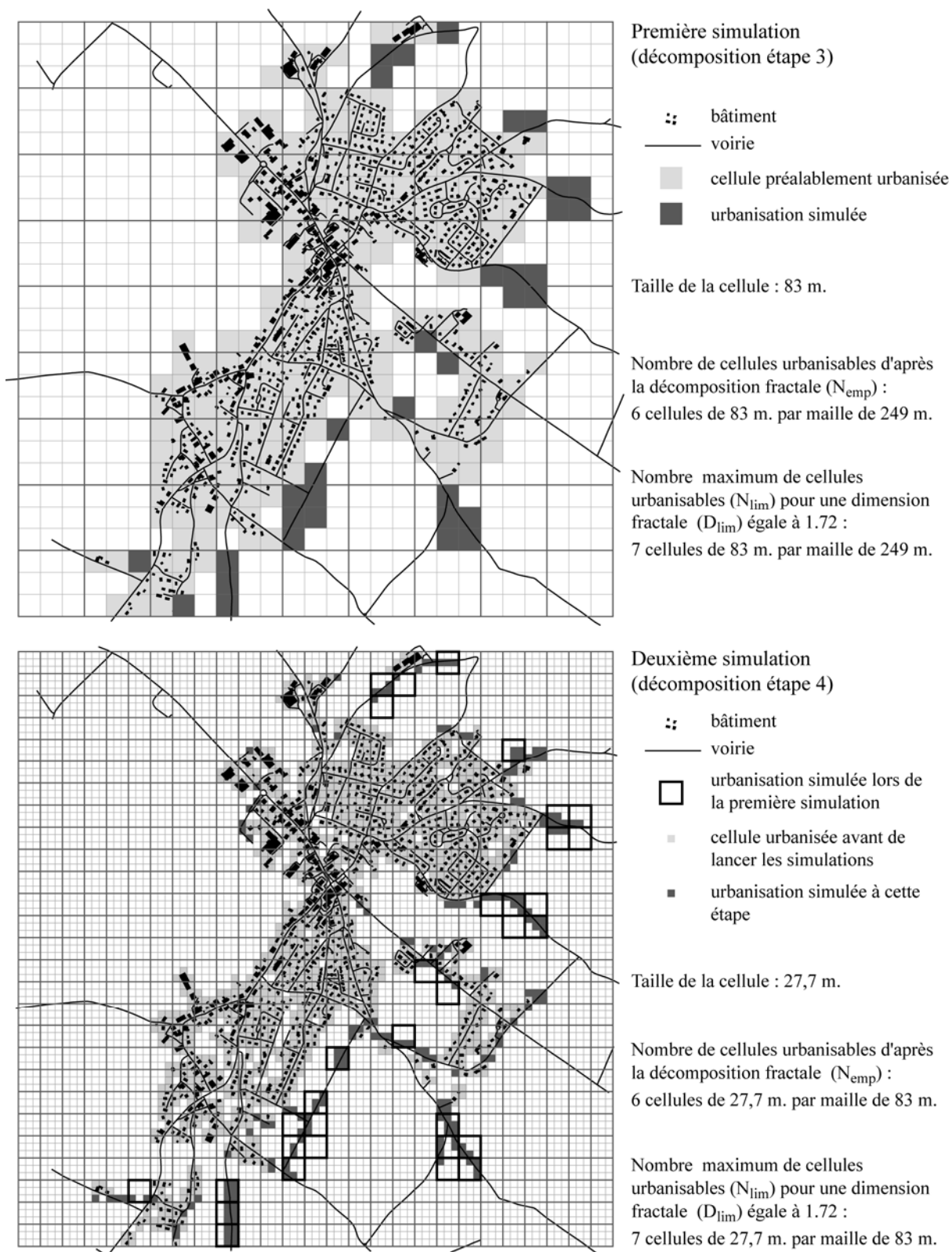
Priorité 1 : règle impérative

Priorité 2 : règle préconisée mais soumise à arbitrage

Priorité 3 : règle est préconisée, mais elle pouvant être outrepassée, si la création de services est prévue. Cette création doit suivre les règles d'accessibilité définies.

La simulation procède par étape, des mailles d'ordre 1 aux mailles d'ordre 2, puis d'ordre 3, etc. (cf. figure 10). En identifiant les potentialités de développement selon une logique multi-échelle, cette méthode s'affranchit de la logique traditionnelle du zonage qui se réfère à une échelle spécifique. Nous avons appliqué la méthode à Saône, bourg-centre pour lequel un certain développement paraît possible :

- Les services sont assez concentrés au centre et sont donc bien accessibles selon les critères définis pour le *niveau 1*.
- L'aire de chalandise théorique des services du *niveau 2* paraît cohérente.
- Le *niveau 3* est accessible par une liaison ferroviaire et routière directe à une distance acceptable (11 km).



**Figure 10**

*Simulation de l'extension de la zone urbanisée de Saône selon une logique fractale*

Remarquons que les simulations effectuées sur le village de Saône n'intègrent pas de modification du réseau. Toutefois, tenant compte des valeurs observées pour la

dimension radiale du réseau et la dimension fractale d'accessibilité, quelques nouvelles branches pourraient être ajoutées à des endroits de faible accessibilité (Ouest du village). Par ailleurs, en raison de la cohérence observée entre desserte et accessibilité, peu d'habitations ont été ajoutées au sein même de la zone déjà urbanisée.

### 7.3. Evaluer les simulations réalisées

Il est prévu que les différentes méthodes d'analyse fractale du tissu bâti et du réseau, de calcul de l'accessibilité aux commerces et services et de l'accessibilité aux espaces verts et naturels, soient *a posteriori* utilisées pour évaluer les scénarios simulés, en terme de réponse aux objectifs définis (accessibilité aux aménités urbaines et rurales, limitation du morcellement des zones bâties et non bâties...).

## 8. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une nouvelle approche conceptuelle qui permet d'aider à l'aménagement du territoire à l'échelle d'une agglomération, en limitant les effets néfastes de l'étalement urbain sans pour autant rejeter celui-ci. L'objectif est de préserver des espaces non urbanisés, afin d'éviter le mitage urbain et de réduire les distances à parcourir en véhicule personnel motorisé pour accéder aux diverses aménités. Cette approche intègre la demande sociale qui souhaite pouvoir bénéficier à la fois de services « urbains » mais aussi d'aménités « rurales » à une distance acceptable du lieu de résidence.

Nous avons montré que la géométrie fractale permet d'introduire une réflexion multi-échelle adaptée aux particularités des nouveaux espaces urbains. La méthodologie développée permet d'évaluer l'état actuel de l'accessibilité aux services de différents niveaux et aux espaces verts et naturels et d'analyser la cohérence entre le bâti et le réseau de transport. En outre, une méthode spécifique, la décomposition fractale, a été imaginée en vue d'analyser l'organisation spatiale du bâti à partir d'une approche multi-échelle spatialisée.

Nous avons ensuite introduit des critères, basés sur les objectifs définis à partir des résultats des analyses, qui permettent d'identifier des lieux dans lesquels un développement futur paraît envisageable. A partir de la représentation multi-échelle obtenue par la décomposition fractale, il a été possible de simuler des scénarios d'urbanisation, selon une logique fractale.

Les travaux se sont jusqu'ici focalisés sur l'échelle des villes et villages périurbains. Un objectif à venir est de mieux intégrer l'accès aux niveaux de service supérieurs (situés dans la ville-centre) et de prendre en compte de manière plus explicite la localisation des points d'entrée sur le réseau de transport en commun.

## Références

Batty, M. and Longley, P. (1994) *Fractal Cities: a Geometry of Form and Function*. London and San Diego: Academic Press.

Banister, D. (1992) 'Energy use, transportation and settlement patterns', in Breheny, M. J. (Ed) *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, 2, pp. 160-181

Beaucire, F., Rosales-Montano, S., Duflos, E. et Turchetti, I. (1999) *Les outils de planification urbaine au service de la relation urbanisme/transport : approche dans la perspective du développement durable*, Synthèse de recherche, Projet DRAST/PREDIT 98MT115, Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, Mai 1999, 20 p.

Benguigui, L. et Daoud, M. (1991) 'Is the suburban railway system a fractal?', *Geographical Analysis*, **23**(4), pp. 362-368

Billard, G. (2000) 'Un nouvel agencement de l'environnement urbain pour une nouvelle forme d'organisation sociale ? Exemple de Seattle à travers la stratégie des Villages urbains', *Annales de géographie*, **611**, pp. 84-93.

Breheny, M. J. (1992) 'Contradictions of the compact city: a review', in Breheny, M. J. (ed) *Sustainable Development and Urban Form, European Research in Regional Science*, **2**, pp. 138-159

Breheny, M. J. (1997) 'Urban compaction: feasible and acceptable?', *Cities*, **14**, pp. 209-217.

Cavailhès, J., Frankhauser, P., Peeters, D. et Thomas I. (2004) 'Where Alonso meets Sierpinski: an urban economic model of fractal metropolitan area', *Environment and Planning A*, **36**, pp. 1471-1498

Christaller, W. (1933) *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, G. Fischer. Reproduction par la Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980.

Dantzig, G. et Saaty, T. (1973) *Compact City: a Plan for a Liveable Urban Environment*, Freeman, San Francisco.

Falconer, K. J. (1985) *The geometry of fractal sets*, Cambridge Tracts in Mathematics Series - **85**, Cambridge University Press, Cambridge NY.

Frankhauser, P. (1994) *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos, Paris.

Frankhauser, P. (1998) 'The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations', *Population: an English Selection*, Special issue *New methodological Approaches in the Social Sciences*, pp. 205-240

Frankhauser, P. (dir.) (2003) *Morphologie des "Villes émergentes" en Europe à travers les analyses fractales*. Rapport de recherche, PUCA (chef du projet : G. Dubois-Taine), 242 p.

Frankhauser, P. et Genre-Grandpierre, C. (1998) 'La géométrie fractale, un nouvel outil d'analyse et de réflexion pour l'investigation des réseaux de transport', *Cahiers Scientifiques du Transport*, **33**, pp. 41-78

Frankhauser, P. et Tannier, C. (2005) 'A multi-scale morphological approach for delimiting urban areas', présenté au colloque CUPUM 05 Computers in Urban

Planning and Urban Management, 9<sup>th</sup> conference, organisé par le CASA-UCL, Juin 2005, London. <http://www.cupum.org/>

Fouchier, V. (1995) 'La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées', *Les Annales de la Recherche Urbaine*, **67**, pp. 95-108.

Garcia, D. et Riera, P. (2003) 'Expansion versus Density in Barcelona: a valuation exercise', *Urban Studies*, **40**(10), pp. 1925-1936.

Genre-Grandpierre, C. (1999) 'La desserte spatiale des réseaux de transport routier : une approche fractale', *Flux*, **38**, pp. 56-68.

Genre-Grandpierre, C. (2000) *Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes*, Thèse de doctorat de géographie, Université de Franche-Comté, Besançon.

Gouyet, J.-F. (1992) *Physique et structures fractales*, Masson, Paris

Newman, P.W.G. et Kenworthy, J.R. (1989) *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Gower, Aldershot/Brookfield, VT.

Newman, P.W.G. et Kenworthy, J.R. (1992) 'Is there a role for physical planners?' *Journal of the American Planning Association*, 58, pp. 353-362

Owens, S. E. (1992) 'Land-use planning for energy efficiency', *Applied Energy*, 43, pp. 81-114

Remy, J. (1994) 'La ville: réseau alvéolaire et mobilité spatiale', in Pellegrino, P. (ed) *Figures architecturales – formes urbaines*, Anthropos, Genève.

Tannier, C. et Frankhauser, P. (2006) 'About the existence or non-existence of an urban envelope in the framework of a multi-scale approach', Workshop MODUS (Modelling Urban Space) 'About the emergence of complex forms and multi-scale patterns', ERG S4, Avril 2006, Paris <http://www.spatial-modelling.info/-MODUS-Modelling-Urban-Space->

Tannier, C., Frankhauser, P., Houot, H. et Vuidel, G. (2006), 'Optimisation de l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales à travers le développement de modèles fractals d'urbanisation', *"Développement local, compétitivité et attractivité des territoires" : XLII<sup>ème</sup> Colloque de l'ASRDLF – XII<sup>ème</sup> Colloque du GREBAM*, Sfax, 4-6 Septembre 2006, 29 p.

Thibault, S. et Marchand, A. (1987) *Réseaux et topologie*, Institut national des sciences appliquées de Lyon.

Tourneux, F. P. (2006), L'évolution de l'occupation du sol dans les franges franciliennes : des artificialisations concentrées plus qu'un étalement urbain ?, in A. Larceneux et C. Boiteux-Orain (dir.) 'Paris et ses franges : étalement urbain et polycentrisme', Editions universitaires de Dijon, collection Sociétés, Dijon, pp. 101

Vuidel, G., Frankhauser, P. et Tannier C. (2006) *Fractalyse 2.4*, logiciel téléchargeable librement à l'adresse <http://fractalyse.org/>

Wiel, M., Tauty, S., Rollier, Y., Morvan, A., Le Guirriec, P., Dese, R.-P. et Barthélémy, J.-P., (1997) *Comportement de mobilité et évolution de l'organisation urbaine (région urbaine de Brest)*, Etude pour la DRAST, la DTT, l'UTP, le Plan urbain, 3 tomes, Agence de développement et d'urbanisme du pays de Brest, 2